

트위스트 피치를 고려한 Bi-2223 선재 제작과 AC 손실 측정 및 분석

論 文
49C - 11 - 1

Fabrication, AC Loss Measurement and Analysis of Bi-2223 Conductors with Respect to Various Twist Pitch

張美惠* · 秋 龍* · 林俊亨** · 朱鎮皓*** · 高太國[§]
(Mi Hye Jang · Yong Chu · Jun Hyung LIM · Jin Ho Joo · Tae Kuk Ko)

Abstract - In this paper, AC losses of Bi-2223 tapes with different twist pitch of superconducting core were fabricated, measured and analyzed. These samples produced by a powder-in-tube method are multi-filamentary tape with Ag matrix. Also, it's produced by non-twist and different twist pitch(8, 10, 13, 30, 50, 70 mm). The critical current measurement was carried out under the environment in Liquid nitrogen and in zero field by 4-probe method. And the AC loss measurement was carried out under the environment of applied time-varying transport current by transport method. From experiment, the critical current is larger non-twist than twisted filament. And, the AC loss by Norris equation is higher non-twisted tape than 13mm twisted tape. Also, it is confirmed that of AC loss of tape having non-twist pitch are larger than those having different twist pitch.

Key word : Bi-2223 multi-filaments, AC losses, Twist pitch, Self-field hysteresis, Eddy current loss, Coupling current loss.

1. 서 론

제2종 초전도체의 전자역학(electrodynamics)적인 것과 AC 히스테리시스(hysteresis) 손실을 설명할 때 일반적으로 임계상태 모델[1]-[2]을 사용하여 설명되어져 왔다. 좀더 복잡한 플랫(flat) 초전도 스트립(strip)에서의 경우 최초로 Swan[3]과 Norris[4]에 의해서 연구되어져 왔다. 그리고 피복선재 Bi-2223 테이프나, 다심 초전도체의 AC 손실은 주로 시변 자계에 의한 것으로 발견되어 졌다 [5]-[7].

또한, 때때로 시변자계에 의한 변화는 플럭스 유동(flux flow), 플럭스 크립(flux creep), 피복재료(matrix)에서 와전류(eddy currents)손실과 내부 필라멘트(Inter-filamentary)에서의 커플링(coupling)손실을 야기하는 것으로 연구되어져 왔다[8]-[9].

이와 같은 것에 근거해서 AC 손실을 절감하기 위한 많은 연구가 진행되어져 오고 있는데, 히스테리

시스(hysteresis) 손실을 절감시키기 위해서는 필라멘트(filament)의 단면적을 감소시키고, 커플링(coupling) 전류를 절감시키기 위해서는 다심 초전도체 필라멘트를 디커플링(decoupling) 시키므로써 가능하고, 디커플링시키기 위해서는 다심 초전도체를 트위스트(twisting) 함으로써 AC 손실을 절감할 수가 있다. 그리고 초전도 선재에서 필라멘트의 피치(pitch)가 수 mm정도가 최적이라 보고된 바 있다[10]-[11].

또한, Bi-2223 고온 초전도선재의 교류손실을 감소시키기 위해서 선재를 트위스트시키는 연구 논문 [12]-[15]이 최근 보고되고 있다. 그러나 재질마다 고유한 특성에 의해서 손실이 발생하므로 아직은 임계전류밀도와 AC 손실에 의한 정확한 규명이 이루어지지 않고 있다.

본 논문에서는 다심(37) 선재를 충전법 (PIT : Powder In Tube)에 의해서 제작하였고 트위스트(twist)하여 다양한 피치를 가진 선재로 가공하였다.

그리고 초전도체의 피치에 따른 임계전류측정은 4단자법(four probe method)으로 제로 필드(zero-field)와 액체 질소 상태에서 측정하였고, 트위스트 피치(twist pitch)에 대한 교류손실 측정은 Bi-2223 선재에 전송전류(transpose current)에 의한 손실을 통전법에 의해서 액체질소 (77 K)상태에서 측정하였다.

또한, 손실 해석은 Norris식에 의한 시뮬레이션 하였다. 이러한 이론식에 의한 시뮬레이션 값과 통전법에

* 正 會 員 : 延世大 電氣工學科 博士修科
** 正 會 員 : 成均館大 金屬工學科 碩士課程
*** 正 會 員 : 成均館大 金屬工學科 助教授 · 公 公
[§] 正 會 員 : 延世大 電氣工學科 教授 · 工 博
接受日字 : 2000年 4月 21日
最終完了 : 2000年 11月 11日

의한 손실 데이터를 측정하여 비교분석하였다.

2. 실험방법

2-1 선재 제작 방법

초전도 Bi-2223의 조성이 $Bi_{1.8}Pb_{0.4}Sr_{2.0}Ca_{2.2}Cu_{3.0}O_{10.8}$ 가 되도록 Bi_2O_3 , PbO, $SrCO_3$, $CaCO_3$ 과 CuO를 적당량 혼합하고 메탄올(CH₃OH)과 산화지르코늄(ZrO₂) 분을 함께 혼합한 후 24 시간 볼 밀(ball mill) 처리하였다. 그리고 분말을 건조, 미분쇄 한 후 700~855 °C, 대기 분위기에서 24 시간, 3 회 하소 처리를 하였다. 하소(calcination)가 끝난 분말을 다시 대기 분위기에서 24 시간, 800 °C로 탈기 처리를 하였다.

이러한 분말을 Ag 튜브(tube)(O.D.=14 mm, I.D.=12 mm)에 장입하여 충전시킨 후 스웨이징과 인발(drawing) 공정을 반복하였다. 또한, 인발 시 단면적 감소율은 10 % 이하로 유지하였으며, 최종 직경 1.75 mm가 되도록 하였다. 제조된 단심 Bi-2223 초전도 선재(wire)를 최종 육각형 단면을 가지는 선재로 가공하고 은(Ag) 튜브 외경과 내경(O.D.= 14 mm, I.D. = 12 mm)에 37개의 육각형 선재를 삽입한 다음 단면 감소율 10 % 미만으로 최종 직경 1.54 mm까지 인발(drawing)하였다. 또한, 인발된 선재는 840 °C, 대기 분위기에서 50시간 소결(sintering) 처리하였다. 선재의 열처리 조건은 표 1과 같고 인발 조건은 그림 1과 같다.

제조된 37심 Bi-2223 선재에 필라멘트들을 트위스트시키기 위한 속도는 RPM 32~2000까지 단계적인 조절을 하였고, 회전 중 가공경화 현상을 제어하기 위해 각 단계별 중간 소둔을 하였다. 다심 선재를 트위스트시키기 위한 장치의 모형도는 그림 2와 같다. 이와 같은 장치에 의한 샘플 공정은 원하는 회

표 1 열처리 조건

Table 1 Condition of heat treatment

특징	조건
소둔비(annealing rate)	5 °C/mm
소둔(annealing)	840 °C, 50 h
열처리 조건	annealing at O ₂ gas
소결비(sintering rate)	3.33 °C/mm

표 2 샘플의 특성

Table 2 Characteristics of sample

Parameter	샘플 필라멘트(filamentary);(37)
	Ag
반경(diameter)	0.05 cm
두께(thickness)	0.002 cm
길이(length)	5 cm
점적율(filling factor)	2.2
트위스트 피치	8, 10, 13, 24, 30, 50, 70[mm]

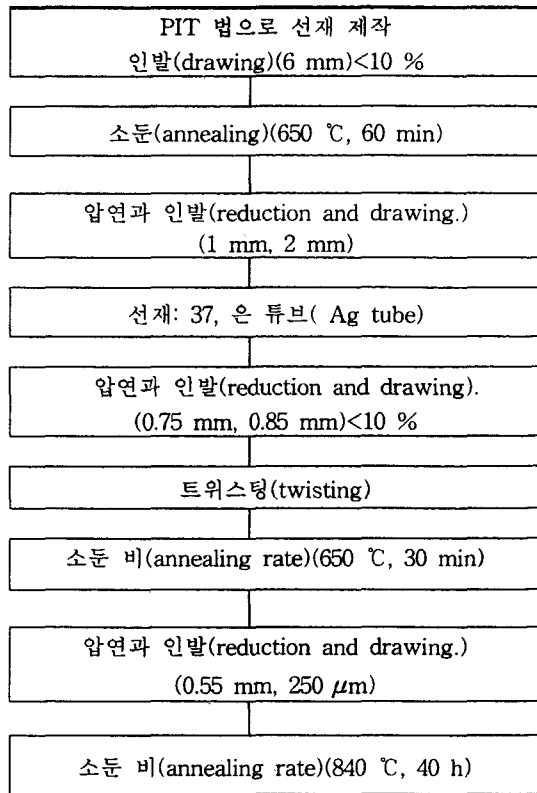


그림 1 다심 선재의 제작 과정.

Fig. 1 Processor of fabrication of multi-filaments.

전수를 인가한 후 두께 감소율 10 % 미만으로 최종 테이프 두께 250 μm까지 압연하였으며 최종 테이프 트위스트 피치는 70, 50, 30, 24, 13, 10, 8 mm가 되도록 제조하였다.

트위스트된 선재의 특성분석으로써 임계전류 측정은 액체질소(77 K)에서 4 단자법으로 측정하였다. 또한, AC 손실을 측정하기 위해서 액체질소(77 K) 상태 하에서 60 Hz인 AC 전송전류(transport current)를 선재에 가변하면서 자체 히스테리시스(hysteresis) 손실을 측정하였고, 전체 개념도는 그림 3과 같다.

2-2 손실측정

또한, AC 손실을 측정하기 위해서 샘플 5 cm 길이 초전도 테이프 선재를 3 cm와 1 cm 사이를 두고 각각 구리 테이프(copper tape)를 초전도 테이프 선재에 납땜하여 양끝 단으로는 전류를 공급하고 저온 신호선 2가닥을 꼬아서(신호 선에서의 유도 기전력을 없애기 위해) 측정할 테이프 선재에 은 뿔질을 하였다. 또한, 접합 및 여러 노이즈에 대해서 최대한 보정하기 위해서 샘플이 없는 상태에서 신호가 최소 값을 갖는 부분의 값을 보정하기 위해서 보정코일로 조정하면서 장비를 설계 제작하여 측정하였다.

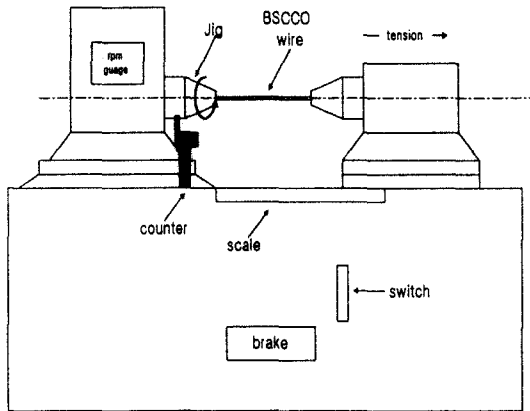


그림 2 Twisting 장비 모식도.
Fig. 2 Schematic diagram of twisting apparatus.

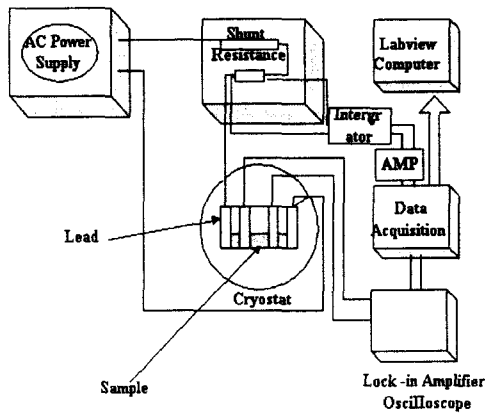


그림 3 AC 손실 측정하기 위한 실험 장비의 블록 선도.
Fig. 3 Schematic drawing of experimental apparatus of main part of AC loss measurement.

그리고 신호선 양단에 발생하는 전압을 락인 앰프(lock-in amp)를 이용하여 전압을 측정하였다. 락인 앰프에서 측정 전류와 동 위상의 전압을 선택하여 테이프 선재 양단 전압으로 측정하여 각 샘플의 발생 전압(EMF)을 적분법에 의해서 계산하여 오픈 앰프(op-amp)를 통해 증폭한 다음 오실로스코프(oscilloscope)와 아날로그 레코더(analog recorder)로 데이터 습득(DAQ : Data Acquisition)하여 RS-485를 통해 컴퓨터로 데이터 처리를 하였다.

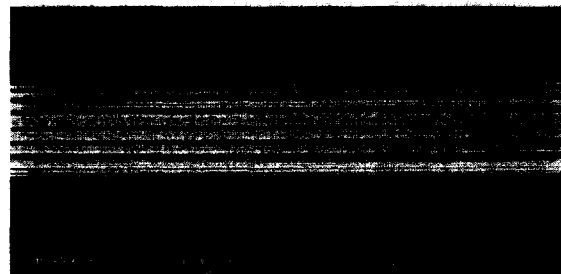
3. 결과 및 토의

그림 4는 트위스트를 하기 전과 후의 미세조직 사진으로서 필라멘트들의 형상을 파악하기 위하여 피복재료를 부식 처리하여 완전히 제거한 후 SEM으로 25 배 확대한 조직 사진이다. 그림 4(a)는 트위

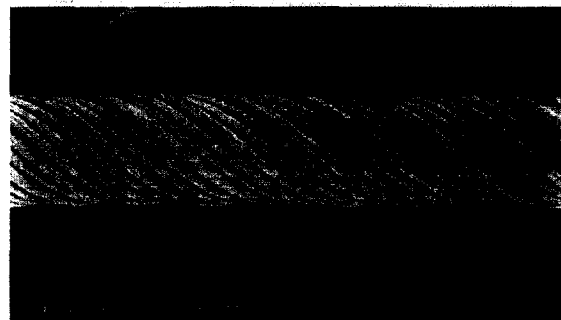
스트하기 전의 미세 조직이며, 그림 4(b)는 200 mm의 선재에 55 번의 회전수를 인가한 후의 조직사진으로써 트위스트 공정의 유무에 관계없이 필라멘트의 손상이나 파달이 일어나지 않은 것으로 관찰되었다. 또한, 트위스트된 선재에서는 그림 4에서 필라멘트들이 균일하게 변형되었음을 알 수 있으며, 시편의 전체 길이에 따라 관찰한 결과에서도 균일하게 나타났다.

그림 5는 트위스트되지 않은 테이프와 피치(pitch) 10 mm로 트위스트된 테이프의 미세조직을 1200 배 확대한 SEM 조직 사진이다. 그림에서 보듯이 트위스트되지 않은 테이프 그림 5(a)에서는 결정립의 크기가 14~32 μm로 측정되었으며, 결정립의 배열이 다소 규칙적이며 균열 등으로 인한 손상은 관찰되지 않았다. 반면에 피치 10 mm로 트위스트된 테이프 그림 5(b)에서는 결정립의 크기가 5~13 μm로 상대적으로 더 미세하고, 결정립의 연결성과 집합 조직이 저하된 것으로 관찰되었다.

이러한 것들은 일반적으로 Ag/초전도심 사이의 계면이 불규칙적이며, 소세지(sausaging) 현상에 의해서 국부적인 필라멘트의 단면적을 감소시켜 임계 특성을 저하시키었다고 본다. 또한 불규칙한 계면은 응력 집중점(stress raiser)으로 작용하여 균열(crack), 또는 미세균열(microcrack)을 발생시켰다고 본다.



(a)



(b)

그림 4 (a) Non-twisted wire (b) twisted wire 부식처리 후 조직사진(25 배).
Fig. 4 SEM photomicrographs of (a) non-twisted wire and (b) twisted wire after Ag-sheath etching(25 times).

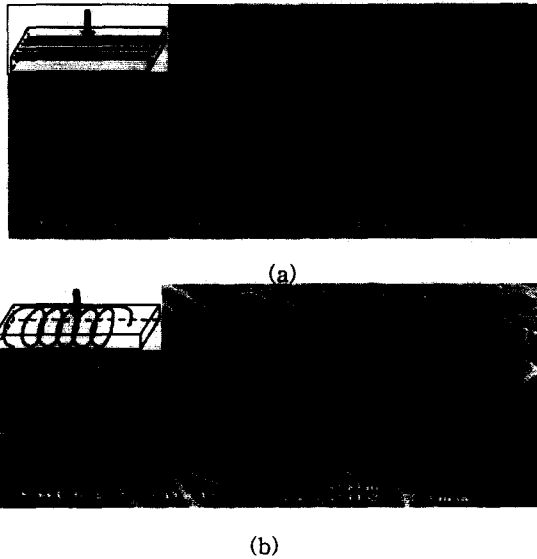


그림 5 미세조직 사진 (a) Non-twisted tape
(b) 10 mm pitch인 twisted tape(1200배).
Fig. 5 Microstructure of (a) non-twisted and
(b) twisted tape (pitch=10 mm)(1200 times).

그러므로 피치가 짧아짐에 따라 나타나는 필라멘트(filament) 형상의 불규칙성은 임계전류 값과 기계적인 특성을 감소시킬 수 있을 것으로 추측된다. 미세조직 관찰 결과 피치가 짧은 시편일수록 계면에서의 결정립 크기는 더 미세하게 나타났으며 집합조직의 정도도 감소하는 것으로 관찰되었다.

그림 6은 피치에 따른 임계전류 값의 변화를 나타낸 것이다. 임계전류 값은 각각 3개의 시편으로부터 측정하여 평균값으로 표시하였다. 그림에서 보듯이 트위스트하지 않은 선재의 임계전류 값은 12.5 A이며, 트위스트 한 선재에서는 피치가 감소할수록 임계전류 값이 감소하는 것을 알 수 있었다.

특히, pitch가 70 mm에서 13 mm로 감소함에 따라 임계전류 값이 12.5 A에서 9.6 A로 완만하게 감소하였으며, 트위스트되지 않는(non-twisted) 테이프에 비해 약 23 %의 감소를 보였다. 이후 피치(pitch)가 감소함에 따라 임계전류 값은 급격히 감소하여 피치(pitch)가 8 mm일 때 임계전류 값은 6.5 A로서 트위스트되지 않는(non-twisted) 테이프보다 약 48 % 감소한 것으로 나타났다. 이러한 임계전류 값의 감소 경향은 계면의 불균일성으로 인한 소세지(sausage) 현상, 결정립의 집합조직 및 입자 크기의 감소, 미세 균열의 존재 등과 관계가 있는 것으로 판단된다.

이론적으로 AC 손실을 분석하기 위해서 AC 히스테리시스(hysteresis) 순간 손실 식은

$$Q_h = \oint \frac{P}{V} dt = \frac{8\lambda\mu_0 J_c \omega H_0}{3\pi} g \left(\frac{I}{I_c} \right) \quad (1)$$

(1)과 같다.

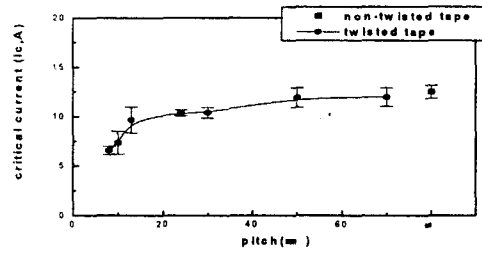


그림 6 Pitch에 따른 임계전류 값의 변화.
Fig. 6 Variation of critical current with various twist pitches.

여기서,

I : 수송전류[A], I_c : 임계수송전류[A], H_0 : 자계의 세기[A/m], J_c : 임계전류밀도[A/m²], μ_0 : 진공투자율[H/m], λ : 점적율, ω : 스트랜드 반경(strand diameter)[m]

히스테리시스 손실 식(1)에서 보면 선재를 트위스트시키므로써 점적율, 스트랜드 반경, 전류밀도와 자속밀도는 히스테리시스 손실과 관련이 있지만, 와전류(eddy current)와 커플링(coupling current) 손실 식은 다음과 같은 함수와 더욱 밀접한 관계가 있는 것으로 나타낼 수 있다.

와전류에 의한 손실 식은 (2)와 같다.

$$Q_e = \frac{\overline{P_e}}{V} = (2\pi f)^2 \cdot \frac{H_0^2 \sigma_2}{2} \left| \frac{R_0^2}{4} + \left(\frac{L_p}{2\pi} \right)^2 \right| \quad (2)$$

여기서,

H_0 ; 인가 자계의 최대치[Oe], f : 주파수[Hz]
 σ_2 ; 도체의 effective conductivity.
 L_p ; twist pitch [cm]와 R_0 ; 도체의 반경[cm]이고,

시정수 τ_{cp} 는 식 (3)과 같다.

$$\tau_{cp} = \mu_0 \frac{L_p^2}{8\pi^2 \rho_{ef}} \quad (3)$$

여기서,

l_p ; 필라멘트의 트위스트 pitch 길이, l_{ef} ; 내부 필라멘트 전류의 효율적인 매트릭스 저항이다.

또한, 커플링에 의한 트위스트 피치의 연관성은 식 (4)와 (5)에서와 같이 연관성이 있는 것으로 나타낼 수 있다.

$$Q_c = \frac{n\pi B_a^2 \omega \tau}{\mu_o (1 + \omega^2 \tau^2)} \quad (4)$$

$$\tau = \mu_o \sigma_c L_p \frac{d_c^2}{16 w_c^2} \quad (5)$$

Q_c 는 결합 전류(coupling current)손실 식 (4)에서, n 은 형태 변수, w 는 스트랜드 반경과 τ 는 시간 상수이고, 식 (5)에서 μ_o 는 초기 투자율(permeability), σ_c 는 초전도심의 단면 전도도, L_p 는 트위스트 피치(twist pitch)이고 d_c 와 w_c 는 초전도심의 두께와 너비이다. 따라서 식 (4)과 식 (5)에 의해서 트위스트 피치(pitch) 감소에 의해 교류 손실이 줄어들 것으로 기대되나 반면에 트위스트(twist)로 수반되는 미세 조직의 불균일에 의해 임계전류 값이 감소되는 단점이 있었다.

또한, 윗 히스테리시스 손실, 와전류와 커플링 손실 식에 의하면 전송전류 I_o 에 의해서 트위스트 피치를 작게 할수록 와전류 손실은 감소되고 커플링 손실은 증가하는 것으로 나타났다.

그리고 Norris 이론 식[4]으로 손실을 계산하면 $I_o < I_c$ 일 때 초전도 선재의 단면 형상이 얇은 테이프(strip)일 경우 식 (6)

$$W = \frac{\mu I_c^2}{2\pi} [(2 - \beta)\beta + 2(1 - \beta) \ln(1 - \beta)] \quad (6)$$

으로 나타낼 수 있고, 초전도 선재의 단면 형상이 타원형(ellipse)일 경우 손실은 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$W = \frac{\mu I_c^2}{\pi} [(1 + \beta) \ln(1 + \beta)] + [(1 + \beta) \ln(1 + \beta) - \beta^2] \quad (7)$$

여기서, $\beta = I_o/I_c$, μ ; 투자율, I_c ; 임계전류, I_o ; 인가전류이다.

그림 7은 식 (6)과 식 (7)에 의해서 시뮬레이션한 것으로써 트위스트 피치 크기 non-twist, 10 mm와 13 mm일 경우에도 임계전류밀도에 의해서 가변으로 나타났고, non-twist가 가장 손실이 적고 13 mm일 경우, 다음 10 mm일 경우로 나타났는데, 실험 치인 그림 9 비교해보면 측정 데이터는 이론식에 의한 판형과 타원형에서 손실 값은 약간 타원형의 수치와 비슷하였다.

그림 8은 통전법에 의해서 손실을 측정하는 전압과 전류의 파형이다. 인가한 전류는 정현파로 나타났는데 샘플 양단의 전압은 고조파가 혼합된 것으로 나타났다. 또한 이러한 값은 보정 코일(cancel coil)에 의해서 전류와 전압 위상을 보정한 값으로 나타났다.

그런데 통전법에 의해서 실험한 결과치 그림 9에서 보면 트위스트시키지 않는 샘플 손실이 가장 적었고 트위스트 피치가 13 mm인 샘플 손실이 작은 것으로 나타난 것을 보면, 샘플에 와전류 손실보다

커플링 손실이 지배적인 것으로 예측할 수 있다.

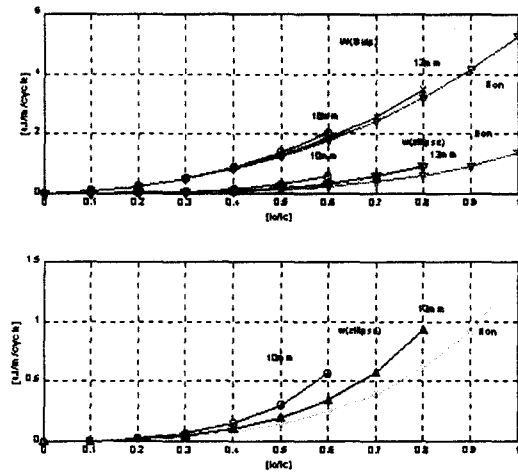


그림 7 트위스트된 Bi-2223 다심 선재의 Norris 식에서 임계전류와 전송전류에 의한 손실
Fig. 7 AC loss by transport current and critical current in Norris's equation of twisted multi-filamentary Bi-2223

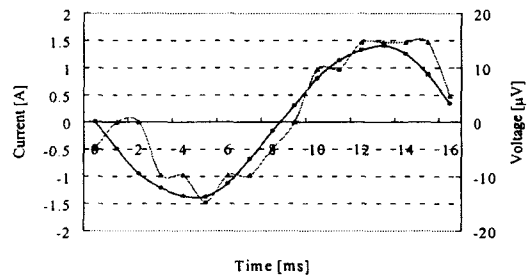


그림 8 통전법에 의한 AC 전류, 전압 파형.
Fig. 8 The wave of AC voltage and current by electrical method.

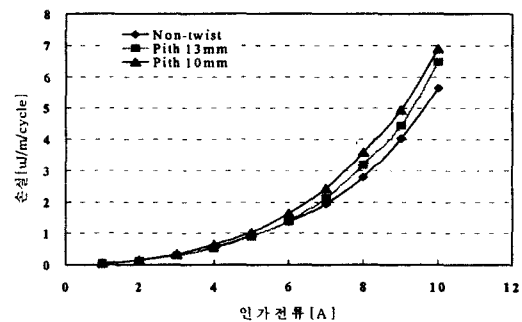


그림 9 트위스트된 Bi-2223 다심 선재의 전송전류에 의한 AC 손실.
Fig. 9 AC loss by transport current in twisted multi-filamentary Bi-2223 wire.

4. 결 론

본 연구 결과 트위스트 된 다심 37 심 Bi-2223 고온초전도 선재의 미세 조직과 임계전류 값의 변화를 관찰한 결과 피치(twist pitch)가 감소함에 따라 결정립의 크기와 집합성이 감소하는 것으로 나타났으며, 이는 회전인가에 의해 Ag와 필라멘트 사이 계면이 불규칙하게 변형된 것과 연관이 있는 것으로 판단된다. 그리고 피치가 감소함에 따라 임계전류 값이 감소하는 경향을 보였는데, 이것은 계면의 불균일성으로 인한 소세지(sausage) 현상, 결정립의 집합조직 및 입자크기의 감소, 미세 균열의 존재 등과 관계가 있는 것으로 판단된다.

또한, 손실 이론 식에 의해서 트위스트의 손실이 가장 지배적인 것은 와전류 손실에 의한 것으로 나타났고, 트위스트 된 임계전류 10 A와 트위스트되지 않는 임계전류 12.8 A의 다심 선재를 Norris 식에 의해서 시뮬레이션 한 결과 3가지 샘플이 거의 판상형(strip)보다 타원형(ellipse) 약 0.5 $\mu\text{J}/\text{m}/\text{cycle}$ 적게 나타났다.

그리고 통전법에 의한 손실 측정결과 실험치는 Norris 식에 의한 판상형 형상과 거의 비슷하였고, 손실은 트위스트되지 않는 것이 Pitch 13 mm일 경우보다 통전전류 10 A에서 0.1 $\mu\text{J}/\text{m}/\text{cycle}$ 적었고, pitch 10 mm 보다는 0.3 $\mu\text{J}/\text{m}/\text{cycle}$ 적은 것으로 나타났다. 이러한 실험 결과로 피치가 작으면 작을 수록 손실이 큰 것으로 알 수 있었다. 그러므로 피치가 클수록 손실이 작은 것을 보면 커플링 손실이 지배적인 것으로 나타났다.

본 연구에서는 전송 전류에 의한 손실을 통전법에 의해서 측정된 경우 만을 비교하였지만, 실제 응용시, 다양한 방법의 손실해석 및 측정이 연구되어야 된다고 사료된다.

감사의 글

본 연구는 1999년도 교육부(학술진흥재단)지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

[1] J. R. Cave, A Fe'vier, T. Verhaege, A. Lacaze Y. Laumond, *IEEE Trans. of Magnetics*, Vol. 25, pp. 1945-1948, 1989

[2] M. Polak, I. Hlasnik, S. Fukui, S. Fukui, N. keda O, Tsukamoto. *Cryogenics*, pp. 261-292, 1991.

[3] G. W. Swan, *J. Math. Phys.* 9(1968)1308.

[4] W.T Norris, *Journal of Physics*, D3, pp 489-507, 1970.

[5] E. H. Brandt, M. Indenbom. *Phys. Rev.* 48(1993) 12893

[6] A. Oota, T. Fukunaga, T. Ho, *Physica.* C270(1996) 107.

[7] K. Kwasnitza, St. Clerc. *Advan. Cryogenic Eng.* 40(1994)53.

[8] Y. Fukumoto, H. J. Wiesman, M. Suenaga, J. *Appl. Phys.* 78(1995)4584

[9] E. Zedov, J. R. Clem, M. MeElfresh, M. Drwin *Phys. Rev. B* 49(1994)9802.

[10] T. Fukunaga, S. Maruyama and A. Oota, *Adv. in Supercond.*, VI, pp. 633-636 (1994)

[11] Tetsuya Fukunaga, Toshihiro Itou, Akio Oota, Junya Maeda and Makoto Hiraoka, *IEEE Trans. appl. superc.*, Vol. 7, No. 2, pp. 1666-1669 June (1997)

[12] W. Goldacker, H. Eckelmann, M. Quilitz, and B. Ullmann, *IEEE Trans. appl. superc.*, Vol. 7 No. 2, pp. 1670-1673 June (1997)

[13] Y. Yang, T. J. Hughes, C. Beduz, F. Darmann, *Physica C* 310, pp. 147-153 (1998)

[14] Jaimoo Yoo, Jaewoong Ko, Haidoo Kim, Hyungsik Chung, *IEEE trans. appl. superc.*, Vol. 9, No. 2, pp. 2163-2166 June (1999)

[15] Yifeng Yang, T. J. Hughes, E. Martinez and C. Beduz, *IEEE trans. appl. superc.* Vol. 9, No. 2, pp. 1177-1180 June (1999)

저 자 소 개



장 미 혜 (張美蕙)
1965년 5월 3일생, 1985년 전북대학교 물리학과 졸업, 1992년 전북대학교 전기공학과 졸업(석사), 현재 연세대학교 전기·전자공학과 박사과정 1985~1989 남원중학교 재직 1992~1995 삼화연구소 책임연구원 1996~1998 에이스기술단 부설연구소 연구실장
Tel : 02-2123-2772
E-mail : jangmi@yonsei.ac.kr



추 용 (秋龍)
1970년 10월 24일생, 1993년 연세대학교 전기공학과 졸업, 1995년 연세대학교 졸업(석사), 현재 연세대학교 전기·전자공학과 박사
Tel : 02-2123 361-2772

E-mail: ychu@yonsei.ac.kr



주 진 호 (朱鎭皓)
성균관대학교 신소재공학과 조교수



고 태 국 (高太國)
1955년 7월 4일생, 1981년 연세대학교 전기공학과 졸업, 1983년 Case Western Reserve University 졸업(석사), 1986년 동 대학원 졸업(공학), 1986~88년 미국 Ohio Cleveland State University 조교수, 현재 연세대학교 전기·전자공학과 교수, 현재 대한전기학회 평의원

Tel : 02-361-2772
E-mail : tkko@yonsei.ac.kr



임 준 형 (林俊亨)
1976년 5월 28일생. 1999년 성균관대학교 금속공학과 졸업 현재 동 대학원 신소재공학과 석사과정
lanosjh@mail.skku.ac.kr